УДК 693.554-486

© М. П. Кострикин, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: kostrikm@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-116-120

© М. P. Kostrikin, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: kostrikm@mail.ru

ХАРАКТЕР И СТЕПЕНЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ МАКРОФИБРЫ С ЦЕМЕНТНЫМ КАМНЕМ

THE CHARACTERISTICS AND EXTENT OF INTERACTION OF SYNTHETIC MACRO FIBER WITH CEMENT STONE

Описан процесс определения характера и степени взаимодействия синтетической макрофибры Durus S500 с цементным камнем и ее критической длины на основе методики, учитывающей распределение и ориентацию армирующих волокон в образцах, характер и условия их работы. Приведены экспериментальные данные для назначения минимально необходимого расхода волокон в смеси для обеспечения армирующего эффекта и формула для расчета характеристики сцепления. Полученная в результате исследования величина касательных напряжений, характеризующая степень взаимодействия фибры с цементным камнем в фибробетоне, составила 0,98 МПа. Критическая длина макрофибры Durus S500, при которой в момент достижения максимальных напряжений в фиброармированном образце происходит ее разрыв, составила 29 мм.

Ключевые слова: фибробетон, макросинтетическая фибра, цементный камень, характеристика взаимодействия, сцепление.

The article presents the results of the study of the process of determining the characteristics and extent of interaction of the Durus S500 synthetic macro-fiber with cement stone and the critical fiber length basing on the methodology, which takes into account the distribution and orientation of the reinforcing fibers in samples, describing the nature and conditions of their co-operation. The experimental data for assigning the minimum fiber consumption required for providing a reinforcing effect and an equation for calculating the adhesion characteristics are presented. The value of tangential stresses obtained as a result of the study, which characterizes the degree of interaction of fiber with cement stone in fiber concrete, was 0.98 MPa. The critical length of the Durus S500 macro fiber, at which with maximum stresses in the fibro-reinforced specimen there took place rupture, was 29 mm.

Keywords: fiber-reinforced concrete, synthetic macro-fiber, cement stone, interaction characteristic, adhesion.

Растущее многообразие типоразмеров армирующих волокон определяет необходимость исследования их взаимодействия с бетонной матрицей. Наряду с достаточно давно используемыми в строительстве металлическими волокнами в последние годы все более широкое применение находит синтетическая фибра.

Предшествующие исследования, посвященные дисперсно армированным бетонам [1, 2, 3, 4], позволили определить характер и степень влияния различных видов дисперсной арматуры на физико-механические характеристики бетонов и разработать рекомендации по их использованию. В частности, микросинтетические волок-

на, имеющие длину до 22 мм и диаметр около 20 мкм, работают на микроуровне, модифицируя структуру матрицы, создавая на границе раздела фаз между волокнами и матрицей структуру с большей плотностью и прочностью, приводя к увеличению морозостойкости и водонепроницаемости фибробетона [2, 5]. Макросинтетические волокна имеют значительно большие размеры, и их применение позволяет повысить прочность и вязкость разрушения композитов, стойкость к ударным и истирающим воздействиям [5].

Одним из относительно новых видов фибры является макросинтетическое волокно *Durus*, выпускаемое бельгийской компанией *Adfil* в раз-

личной размерной конфигурации. В данной статье представлены результаты исследований армирующего волокна *Durus S500* (рис. 1), технические характеристики которого приведены в таблице¹.

Важным параметром, описывающим характер взаимодействия волокна с бетонной матрицей, является величина сцепления, численно характеризующаяся значением величины касательных напряжений на границе раздела «волокно–матрица» при растяжении. Значение данной величины непосредственно определяет, каким образом будет происходить разрушение фибробетонного композита. Известно [1, 2, 6], что различные виды волокон по-разному работают в бетонной матрице. Хрупкий характер разрушения, аналогичный разрушению неармированного бетона, будет наблюдаться при максимальных напряжениях внутри волокон, превышающих предел их прочности, приводящих к разрыву фибры. С другой стороны, нарушение связи между волокном и бетонной матрицей влечет за собой вязкое разрушение фибробетона, вместе с которым волокна вытягиваются из композита. «Величина сцепления, в свою очередь, зависит от площади боковой поверхности фибры, контактирующей с цементным камнем в бетоне, и значит, от ее формы и размеров» [7]. Зачастую прочность сцепления волокна оказывается недостаточной для ее надежной анкеровки в матрице, вследствие чего волокна вытягиваются из нее. Энергия, затрачиваемая на разрушение образца, расходуется на преодоление сил трения на границе раздела и оказывается значительно меньшей, чем энергия, необходимая для разрушения само-

Характеристики волокна *Durus S500*

Характеристика	Значение
Материал	Модифицированный полипропилен
Истинная плотность	0,922 кг/м ³
Точка плавления	165 °С
Длина	48 мм
Эквивалентный диаметр	0,7 мм
l/d	69
Модуль упругости	5740 МПа
Прочность на растяжение	417 МПа

го волокна. Для повышения степени анкеровки волокна в матрице применяются различные технологические приемы на этапе производства: создание анкеров на концах или волнового профиля для стальных проволоочных волокон, увеличение боковой поверхности путем создания переменного профиля для фибр как из металла, так и синтетических. Значительной прочностью сцепления обладает аморфнометаллическая фибра — отрезки лент определенной длины, 3 мм по ширине и со средней толщиной 0,03 мм. Как минимум на одной из поверхностей ленты создан микрорельеф в виде поперечных выступов и впадин, располагающихся перпендикулярно под углом или под разными углами к продольной оси, или в виде точечных углублений и выступов на поверхности [6], призванный повысить прочность сцепления фибры с матрицей.

Для определения характеристики взаимодействия волокон с матрицей в СПбГАСУ разработан расчетно-экспериментальный метод, в котором учитываются расположение и ориентация волокон в образце, характер и условия их работы в матрице. Суть методики определения характеристики взаимодействия (ф_т) заключается в нахождении опытным путем такого минимального процента армирования бетона, до которого вводимые волокна практически не проявляют армирующего эффекта, но после которого наблюдается устойчивый рост прочности композита [7]. Расчет величины взаимодействия (ф_т) осуществляется по формуле

$$(\text{ф}_\tau) = \frac{R_{\text{фц}} - 3,5R_{\text{кз}}\mu_{\text{min}} - (1 - 4,5\mu_{\text{min}})R_{\text{цк}}}{2\frac{l}{d}\mu_{\text{min}}}, \quad (1)$$

Рис. 1. Макросинтетическое волокно *Durus S500*

¹ URL: http://www.adfil.com/media/2043/leaflet_adfil_durus_s500_uk_wt_rgb.pdf

где $R_{\text{фц}}$ — прочность фиброцемента, численно равная прочности композита при μ_{min} , кН; μ_{min} — минимальный процент армирования, определенный по результатам испытаний; $R_{\text{кз}}$ — прочность контактной зоны, кН; $R_{\text{цк}}$ — прочность цементного камня, равная прочности неармированного образца, кН; l — длина фибры, см; d — эквивалентный диаметр фибры, см; (φ) — «комплексный коэффициент, не требующий расшифровки при выполнении расчетов по уравнению прочности фибробетона» [1].

В соответствии с методикой [8] испытания проводились на цементном тесте нормальной густоты, из которого формовались образцы-призмы размерами 70×70×280 мм. Изначально производилось формирование контрольных образцов, не имеющих армирования, затем — армированных 0,1 % фибры, после чего последовательно в каждом из составов увеличивалось объемное содержание волокон с шагом 0,1 %, и из каждого состава формовались образцы-призмы. В опытах использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Сланцевского цементного завода «Цесла». Приготовление смесей осуществлялось в лабораторном смесителе принудительного действия ЛС-ЦБ-10. Введение фибры в цементное тесто производилось постепенно во избежание комкования. Величина предельного насыщения цементной матрицы волокнами определялась экспериментально в соответствии с возможностью обеспечения технологичности фиброцементной смеси. После формования образцы выдерживались в камере нормального твердения в течение 28 суток, затем подвергались испытаниям на растяжение при изгибе, по итогам которых был построен график зависимости прочности образца от объемного содержания волокон (рис. 2).

Максимальное содержание волокон было принято 1,5 % по объему, так как удобоукладываемость цементного теста при превышении данного порога содержания фибры *Durus S500* становится слишком низкой при водоцементном отношении, равном нормальной густоте цементного теста.

На графике, представленном на рис. 2, видно, что начиная с расхода волокна, равного 1,0 %, наблюдается устойчивый рост прочности композита. Прочность композита в данной точке рассчитывается по формуле

$$R_{\text{фц}} = \frac{3P_{\text{к}}l}{2bh^2} = \frac{3 \cdot 593 \cdot 26,6}{2 \cdot 7 \cdot 7^2} = 68,8 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = 6,88 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где $P_{\text{к}}$ — нагрузка, соответствующая моменту начала устойчивого роста прочности композита, кН; l — база испытания, см; b — ширина образца, см; h — высота образца, см.

Таким образом, исходя из соотношения (1), величина взаимодействия макросинтетической фибры с матрицей рассчитывается по формуле

$$(\varphi) = \frac{6,88 - 3,5 \cdot 7,73 \cdot 0,01 - (1 - 4,5 \cdot 0,01) \cdot 5,52}{2 \frac{48}{0,7} \cdot 0,01} = 0,98 \text{ МПа}. \quad (3)$$

Осмотр образцов-призм после испытания показал, что часть волокон, попавших в зону развития магистральной трещины, в результате испытания была разорвана, а часть вытянулась из цементной матрицы. Критической длиной волокна называется минимальная длина, при которой волокна в композите разрушаются от растягивающих напряжений. Известна [3, 4, 6] зависимость (6), позволяющая рассчитать критическую длину волокна на основании величины касательных напряжений на границе раздела волокно–матрица.

Из условия равновесия внутренних и внешних сил

$$R_{\text{к}} = 2\tau_{\text{к}} \frac{l_{\text{ф}}}{d_{\text{ф}}} \mu, \quad (4)$$

где $R_{\text{к}}$ — нагрузка, соответствующая моменту начала устойчивого роста прочности композита, кН; $\tau_{\text{к}}$ — касательные напряжения на границе раздела фаз, МПа; $l_{\text{ф}}$ — длина фибры, см; $d_{\text{ф}}$ — диаметр фибры, см; μ — концентрация волокон в фибробетоне.

Рис. 2. График зависимости прочности от объемного содержания волокон

Касательные напряжения на границе раздела фаз будут равны:

$$\tau_k = \frac{R_k d_{\phi}}{2l_{\phi\mu}} = \frac{69 \cdot 0,07}{2 \cdot 4,8 \cdot 0,01} = 50,31 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = 5,03 \text{ МПа. (5)}$$

Следовательно, критическая длина волокна будет равна:

$$l_{\text{кр}} = \frac{R_k d_{\phi}}{2\tau} = \frac{417 \cdot 0,7}{2 \cdot 5,03} = 29,01 \text{ мм. (6)}$$

Критическая длина волокна ниже, чем фактическая длина фибры *Durus S500*, равная 48 мм, поэтому попавшие в зону разрушения образца волокна разрывались. Часть волокон, напротив, вытягивалась из цементного камня, поскольку попала в зону образования магистральной трещины концом, который короче критической длины волокна. Такое поведение волокон способствует повышению вязкости разрушения, так как в предшествующих работах установлено, что «энергетические затраты на вытягивание фибры гораздо выше энергии, связанной с разрушением границ раздела фаз, а значит, чтобы повысить вязкость разрушения фибробетона, следует применять волокна длиной меньше, чем критическая длина ($l_{\text{кр}} \geq l$)» [9].

Значения количественной характеристики взаимодействия макросинтетической фибры *Durus S500* с матрицей ($\sigma_{\text{фр}} = 0,98$ МПа) и критической длины этого волокна ($l_{\text{кр}} = 29,01$ мм), полученные в ходе исследования, могут быть использованы в дальнейших исследованиях и в расчетах строительных конструкций.

Библиографический список

1. Пухаренко Ю. В. Принципы формирования структуры и прочности фибробетонов // Строительные материалы. 2004. № 10. С. 47–50.
2. Кострикин М. П. Повышение эффективности дисперсного армирования путем комбинирования высоко- и низко модульных волокон // Актуальные проблемы строительства: Материалы 69-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 305–309.
3. Жаворонков М. И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. Вып. 41 (60). С. 34–43.
4. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Морозов В. И., Магдеев У. Х. Прочность и деформативность поли-

армированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 107–111.

5. Кострикин М. П. Влияние дисперсного армирования на долговечность цементных бетонов для дорожного строительства // Актуальные проблемы строительства: Материалы 70-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: СПбГАСУ, 2017. С. 102–106.

6. Магдеев У. Х., Пухаренко Ю. В., Морозов В. И., Пантелеев Д. А. и др. Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: «Строительство и архитектура». 2013. № 31–2 (50). С. 132–135.

7. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 172–176.

8. Жаворонков М. И. Развитие методов определения характеристик трещиностойкости фибробетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 22 с.

9. Пантелеев Д. А. Полиармированные фибробетоны с использованием аморфнометаллической фибры: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 155 с.

References

1. Pukharens Yu. V. *Printsipy formirovaniya struktury i prochnosti fibrobetonov* [Principles of formation of structure and strength of fiber-reinforced concrete]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2004, no. 10, pp. 47–50.
2. Kostrikin M. P. *Povyshenie ehffektivnosti dispersnogo armirovaniya putem kombinirovaniya vysoko- i nizkomodul'nykh volokon* [Increasing the efficiency of dispersion reinforcement by combination of high- modular and low-modular fibers]. *Trudy 69-y Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i doktorantov «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proc. of the 69-th All-Russia sci.-pract. conf. of students, graduate students, young scientists and doctoral candidates “Current problems of construction”]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2016, pp. 305–309.
3. Zhavoronkov M. I. *Opredelenie kharakteristik razrusheniya i modulya uprugosti fibrobetona* [Determining the fiber reinforced concrete characteristics of fracture and module of elasticity]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*, 2015, no. 41 (60), pp. 34–43.
4. Pukharens Yu. V., Panteleev D. A., Morozov V. I., Magdeev U. Kh. *Prochnost' i deformativnost' poliarmirovan-*

nogo fibrobetona s primeneniem amorfnoy metallicheskoй fibry [Strength and deformability of the poly-reinforced fiber concrete with application of amorphous metal fiber]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and construction*, 2016, no. 1, pp. 107–111.

5. Kostrikin M. P. *Vliyanie dispersnogo armirovaniya na dolgovechnost' tsementnykh betonov dlya dorozhnogo stroitel'stva* [The influence of dispersion reinforcement on the durability of cement concrete for road construction]. *Trudy 70-y Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i doktorantov «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proc. of the 70-th All-Russia sci.-pract. conf. of students, graduate students, young scientists and doctoral candidates "Current problems of construction"]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2017, pp. 102–106.

6. Magdeev U. Kh., et al. *Issledovanie svoystv stalefibrobetona na osnove amorfnoy metallicheskoй fibry* [Research of properties of steel fiber reinforced concrete on the basis of amorphous metal fiber]. *Vestnik Volgogradskogo*

gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2013, no. 31 – 2 (50), pp. 132–135.

7. Pukhareno Yu. V., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. *Opreделение vклада fibry v formirovaniye prochnosti stalefibrobetona* [Determination of fiber contribution in creation of the strength of steel fiber reinforced concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1 (60), pp. 172–176.

8. Zhavoronkov M. I. *Razvitie metodov opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti fibrobetona. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Development of methods of determining the crack resistance properties of steel fiber reinforced concrete]. St. Petersburg, 2017, 22 p.

9. Panteleev D. A. *Poliarmirovannyye fibrobetony s ispol'zovaniem amorfno-metallicheskoй fibry. Diss. kand. tekhn. nauk* [Poly-reinforced steel fiber concrete with use of amorphous metal fiber. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 155 p.